풍화토구간을 통과하는 천층터널의 막장선행변위에 대한 연구

The Study On The Pre-displacement Before Face Of The Shallow Tunnel In The Weathered Soil

강석기*　　윤주상**

Kang, Suk Ki　　**Yoon, Ju-Sang**

ABSTRACT

Nowadays many urban subways are frequently constructed under the building and the river by the use of tunneling method. Especially, the majority of the tunnel are constructed even with shallow depth under the ground in the weathered soil. Since the tunnel are generally designed on the basis of the geographic soil investigation, the stability of the tunnel should be checked with the realistic data instrumented during construction. The displacement of the tunnel occurs in front of the end face during the excavation of the tunnel, which is called as pre-displacement. The total displacement can be figured from the exact pre-displacement, which is very difficult to measure without using any device installed in front of the tunnel end face. In this study, the pre-displacement measured from horizontal inclinometer was analyzed to know the co-relation with the total displacement and also, the trend and the characteristics of the tunnel deformation during construction was suggested through the regression analysis of the measured data.

1. 서 론

도심지 지하철 노선이 증가하면서 지하철 노선이 협소한 이면도로나 사유지(주택, 빌딩) 및 하천하부 등을 통과하는 경우가 빈번해지고 있다. 실제 서울 제2기 지하철의 경우 지하수위가 높고 터널심도가 20m 이내인 천층터널이 전체의 약 62%이며, 대부분 막장면이 풍화암 및 토사의 연약지반에 시공되는 터널연장은 전체의 약 55%를 차지하고 있는 실정이다(서울시 지하철건설본부, 1994).

지반조사를 바탕으로 이루어지는 터널설계는 실제 지반조건을 모두 고려할 수 없기 때문에 시공을 하면서 계측을 통해 지반과 터널의 안정성을 평가하는 것이 중요하다.

터널굴착에 의해서 각 막장 이전에서도 변위가 발생하는데 이러한 변위 등을 선행변위라 하며, 굴착이 터널에 미치는 영향을 평가함에 있어서 선행변위량을 측정함으로써 지반의 전체변위를 측정할 수 있다. 그러나 현실적으로 굴착 전 지반에서 발생하는 변위의 양과 막장 형성 후 계측개시까지 발생하는 변위의 양을 정확히 측정하는 것은 매우 힘들다

본 연구에서는 상부구조물과 터널과의 심도가 2D이내인 풍화토터널 시공시 계측하기 어려운 선행변위를 수평경사계를 이용하여 보다 정확하게 실측하여 전체변위와의 상관관계를 파악하고자 하였다. 또한 도심지내 천층 터널구간에서 시공 중 측정된 계측결과를 회귀분석을 통해 경향을 제시하고, 변위량과 수렴일자의 상관관계를 분석하였다.

* 강석기 : 정회원, 대림산업,(주) 지하철9호선 906공구, 현장소장
E-mail : skkang77@hanmail.net
TEL : (02)3663-6648　FAX : (02)3663-6898

** 윤주상 : 비회원, 대림산업,(주) 지하철9호선 906공구, 차장
E-mail : yoonjs@daelim.co.kr
TEL : (02)3663-6648　FAX : (02)3663-6898

2. 터널선행변위에 대한 기존의 연구

터널의 변위는 막장면 진행의 영향과 막장면 주변의 하중이력에 대응한 지반의 변형특성에 의해 결정된다. 터널벽면에서 발생하는 종방향변위의 일반적인 형태는 그림 1과 같다.

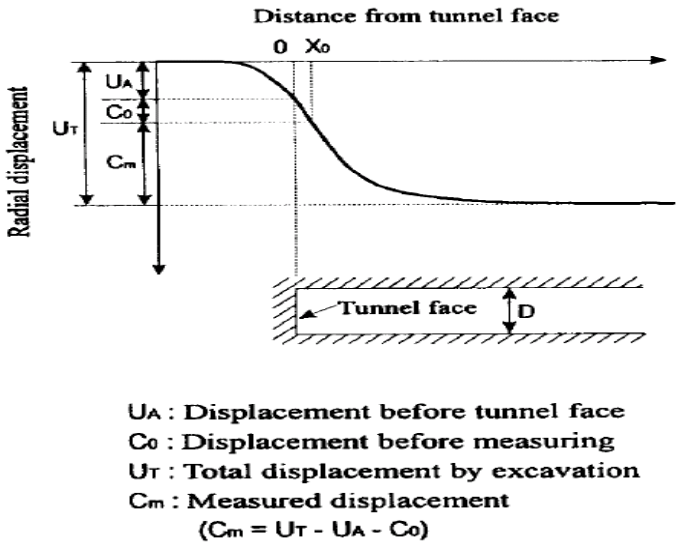


그림 1. 막장진행에 따른 종방향변위(Vassilev, 1988)

굴착으로 인해 발생하는 총변위는 막장면이 도달하기 전에 발생하는 U_A(선행변위), 그리고 막장면이 도달한 후부터 막장면에서 x_0만큼 떨어져서 시간 t_0만큼 경과하여 계측기를 설치하기 전까지 발생한 변위 C_0, 실제로 계측된 변위 C_m으로 크게 나눌 수 있다(김호영 외, 1993).

Panet(1982)에 의한 Axi - symmetric FEM 해석에 따르면 최종변위 U_t에 대한 U_a 의 비율은 탄성해석에서 27%, 소성해석시 Von Mises 파괴조건일 때 30%, 완전탄소성 Drunker 파괴조건에서 20%, Strain -softening재료에서는 21%로 계산되었다. Hanafy(1980)에 의해 수행된 점탄성 Axi- symmetric FEM 해석의 경우, U_a의 비율은 30% 내외로 나타났다. 한편 Vassilev(1988)는 터널 형상에 의한 영향을 규명하기 위하여 3차원 탄성 FEM 해석을 실시하였으며, 그 결과는 그림 2와 같다. 즉, U_a의 비율은 28 ~32%로서 터널의 형상에 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

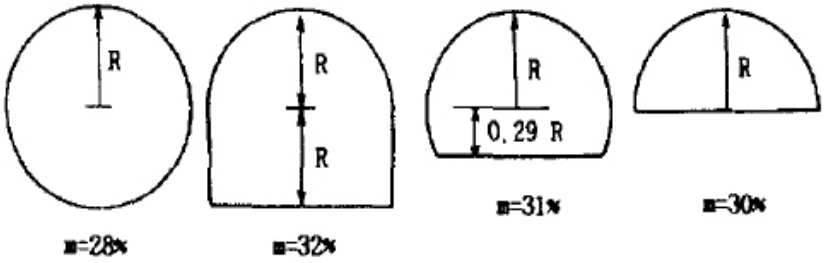


그림 2. 단면 형상의 영향; m=U_a/U_t(Vassilev, 1988)

전술한 세 가지 사례는 모두 보강이 없는 경우에 대한 해석으로서, 그 결과를 다음과 같이 요약할 수 있다. 즉, 일반적인 탄성, 점탄성 또는 탄소성 암반에서 보강이 없는 경우 굴착면 이전에 발생하는 변위는, 작업장 후방에서 응력조건이 2차원 상태로 수렴될 때까지 발생하는 최종 변위의 20~35% 수준이 되

며, 그 값은 터널의 형상에 큰 영향을 받지 않는다.

이정인(1991)은 지하암반공동 굴착시 계측된 내공변위자료를 입력치로 하여 3차원 수치해석을 하여 선행변위를 산정하였다. 그에 따르면 측압계수비가 0.5, 1.0, 1.5로 증가함에 따라 선행변위는 전체변위량의 57%, 51%, 44%로 감소하였으며 막장으로부터 터널 폭의 약 1배 거리에서 천단침하는 전체침하의 약 75~80%가 발생하였다.

Kitagawa(1991)은 도로암반터널 시공시 서비스터널을 선 시공한 후 신축계(extensometer)를 본 터널에 평행하게 설치하여 선행변위를 계측하였고, 그 결과 선행변위는 전체변위의 약 40%라고 제시하였다. 김호영(1993)은 광산터널에 대한 내공변위자료를 회귀분석하여 선행변위는 전체변위의 30~40%에 달한다고 제시하였다. 허종석(1996)은 서울지하철 하저터널에서 계측된 내공변위 및 천단침하 자료를 역해석 입력치로 이용하여 수치해석을 하였고 선행변위는 전체변위의 약 10%를 제시하였다. 다른 연구자들에 비해 값이 작은 이유는 보강이 많이 이루어졌기 때문이라고 본문에서 밝히고 있으며 실제 지반의 거동은 지중변위결과를 입력했을 때 더 정확했다고 한다. 그에 따르면 지중변위 자료를 근거로 선행변위를 추정했을 때 전체변위의 약 26~41%라고 한다. 김광염(2003)은 단층파쇄대를 통과하는 터널 공사시 수평경사계를 이용한 선행변위 계측자료를 이용하여 선행변위는 전체변위의 약 60%에 달하며 선행변위를 30%로 일률적으로 고정하여 사용하는 것은 위험하다고 지적하였다.

기존연구자들이 제시한 선행변위의 크기를 도표 1로 나타내었다.

도표 1. 기존연구자들이 제시한 선행변위량

	저자	년도	선행변위량(%)	해석종류	해석조건	비고
1	Hanafy	1980	30	수치해석	암반, 점탄성	무보강
2	Panet	1982	20~30	수치해석	암반, 탄성, 소성, 완전탄소성, Strain Softening	무보강
3	Vassilev etc	1988	28~32	수치해석	암반, 탄성, 점탄성, 탄소성,	형상고려, 무보강
4	Kitagawa etc	1991	40	계측	암반, extensometer	보강
5	이정인 등	1991	44~57	역해석	암반	측압계수비 고려
6	김호영 등	1993	30~40	계측	암반	회귀분석에 의한 유추
7	허종석 등	1996	26~41	역해석	암반, 탄성, 점탄성, 탄소성	보강
8	김광염 등	2003	60	계측	암반, 수평경사계	보강, 단층파쇄대

* 선행변위량은 전체변위량에 대한 비율로 표시

3. 계측 방법 및 계기

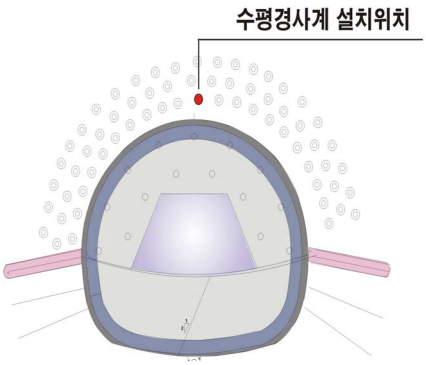
본 연구에서는 현재까지 계측하기 곤란했던 선행변위를 보다 정확하게 실측하고자 계측방법을 개선하였다. 또한 지표침하계가 지상건물로 인해 터널 연직 상부가 아닌 좌우측으로 이격되어 설치할 수밖에 없는 관계로 지표침하를 계측한 자료는 분석대상에서 제외하였다.

3.1 수평경사계(Horizontal Inclinometer)

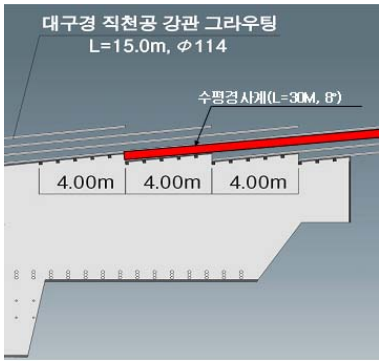
선행변위 측정 기법에는 파이프 변형률을 이용한 방법과 수평경사계를 이용한 방법이 있으며 본 연구에서는 수평경사계를 이용하였다. 수평경사계의 장점은 아칭작용에 의해 굴착 이전 막장 전반부에서 발생하는 침하량과 굴착직후 발생하는 침하량을 측정할 수 있다는 점이다.

수평경사계를 이용한 방법은 터널막장 천단에서 터널 종방향으로 연질관을 설치한 후 그 내부에 수평

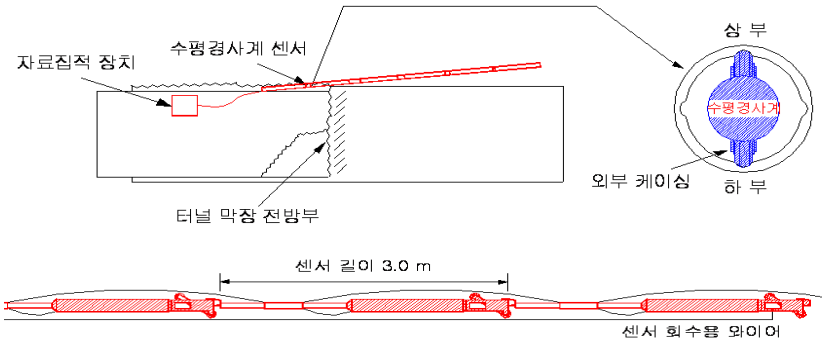
경사계를 설치하여 연질관의 변위량(처짐량)을 구하는 방법이다. 이 측정법의 측정원리는 강관의 길이방향을 따라 경사계를 설치하여 강관의 휨변위를 측정하는 것으로서, 보통 3m 간격으로 관내에 수평경사계를 설치하여 계측하며, 계측 종료 후에 계측기를 회수하여 재사용이 가능하다.



(a) 수평경사계의 설치(정면)



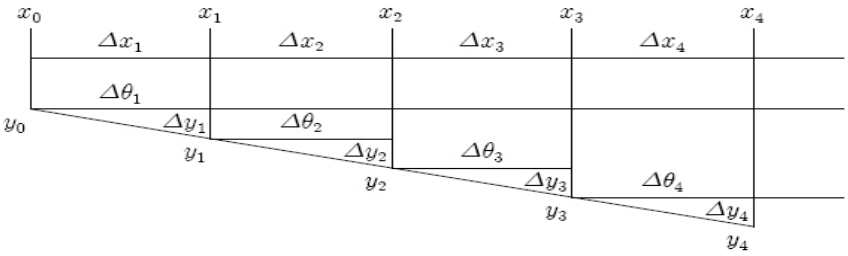
(b) 수평경사계의 설치(측면)



3.0 m의 센서를 케이블을 통하여 연결하여 10 개의 센서를 조립.

(c) 수평경사계의 상세도

그림 3. 수평경사계의 설치방법



$$y_0 = 0$$
$$y_1 = y_0 + \Delta y_1$$
$$y_2 = y_0 + \Delta y_1 + \Delta y_2$$
$$\vdots$$
$$y_n = \sum_{n=0}^{n} \Delta y_n$$

$y_0 \sim y_n$: 누적 천단변위

$\Delta y_1 \sim \Delta y_n$: 구간 천단변위($\Delta y_n = \Delta x_n \times tan\Delta\theta_n$)

$\Delta x_1 \sim \Delta x_n$: 구간거리

$\Delta\theta_1 \sim \Delta\theta_n$: 구간경사각

그림 4. 수평경사계를 이용한 천단변위 계산방법(김광염 등, 2003)

3.2 선행침하량의 계산방법

수평경사계에서 측정되는 변위는 막장의 굴착 전에 발생하는 선행변위와 굴착 직후의 최초 계측 시점 사이에서 발생되는 초기변위 그리고 시간경과에 따라 측정되는 계측변위 등으로 나누어지며, 이를 이용하여 막장 면과 막장 전방에서 발생한 선행변위 비율을 식(1)처럼 결정할 수 있다.

$$k = \left(\frac{\delta_p}{\delta_t}\right) \times 100 \qquad (1)$$

여기서, k = 선행변위 비율(preceding displacement ratio)
δp = 수평경사계변위(Displacement of horizontal inclinometer)
δt = 전체변위(total displacement)

계측된 수평경사계의 변위는 막장굴착 전 발생변위인 선행변위와 최초계측 지점사이의 발생변위인 초기변위의 합이다. 전체변위는 선행변위와 초기변위, 계측된 변위의 합으로 표현할 수 있다. 선행침하 비율이란 수평경사계 변위를 전체변위(수평경사계 변위 + 천단침하)로 나눈 값이다.

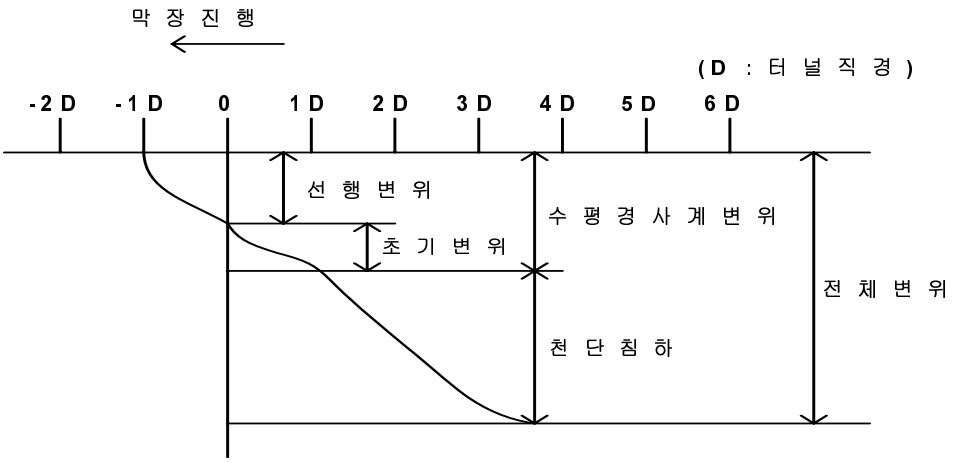


그림 6. 선행변위 측정의 개념

4. 현장계측결과

4.1 수평경사계의 계측결과

수평경사계를 통한 선행변위 계측은 STA. 10K+60~127지점(2막장)과 STA. 10K+601~668지점(4막장)에서 수행되었다. 전자는 터널이 풍화암과 풍화토를 통과하는 구간으로 심도는 평균 약 17m이며, 후자는 풍화토를 통과하는 구간으로 심도는 약 10m이다. 2막장의 굴착속도는 1.6m/day이고 4막장에서는 0.8m/day이었다.

선행 변위량의 파악을 위한 막장면 수평경사계의 계측변위 산정은 천공 홀의 가장 안쪽(계측기 1번)을 기준점으로 가정하여 계산하였으며, 센서의 회수시기는 설치 후, 센서의 끝 지점(28m구간)에서 재설치하고, 상반굴진 완료 후 수렴시까지의 발생변위량을 후행변위로 산정하여 계산하였다. 이는 상·하반을 분할하여 굴착한 경우, 굴착 진행에 따라 초기에 대부분의 침하량이 발생된다는 수치해석 결과에 따른 것이다.

굴착 이전에 발생하는 선행변위는 암반의 변형 특성에 의존하는 것으로 알려져 있으며, 수치해석 결과에 의하면 상·하반을 분할하여 굴착한 경우, 굴착 진행에 따라 초기에 대부분의 침하량이 발생된다고 한다.

2막장의 하부구간인 STA. 10K+060～10K+127 지점에 설치된 수평경사계의 발생변위량의 범위는 10～35mm이였으며 평균 18.36mm로 나타났다. 측정된 천단침하량은 평균 22.35mm이었고 최종변위량은 20～60mm로 평균 40.71mm로 나타났기 때문에 45.27%의 평균 선행침하비율로 나타났다.

4막장의 통과구간인 STA. 10K+601～10K+668 지점에 설치된 수평경사계의 발생변위량의 범위는 10～40mm이였으며 평균 24.51mm로 나타났으며, 측정된 천단침하량은 평균 24.51mm이었고 최종변위량은 34～75mm로 평균 52.08mm로 나타나 선행침하 비율은 47.77%인 것으로 나타났다.

그러므로, 최종적인 수평경사계의 평균발생 변위량은 21.44mm이고, 계측된 천단침하의 평균치는 24.96mm, 최종변위량은 평균 46.40mm로 나타나 전체구간의 평균 선행침하 비율은 46.52%인 것으로 나타났다. 즉, 막장면에 도달하여 계측을 시작하기 전에 전체변위량의 약 50%에 해당하는 변위가 이미 발생하였음을 알 수 있었다.

다음 도표 4는 상반굴착시 설치위치별 선행침하 비율을 요약하였다.

도표 4. 상반굴착시 발생위치별 선행침하 변화비율(단위 : mm)

2막장	설치위치	10K 128	10K 124	10K 120	10K 116	10K 099	10K 095	10K 092	10K 088
	선행침하량	(-)23.48	(-)26.24	(-)28.17	(-)24.65	(-)10.03	(-)11.88	(-)13.58	(-)11.01
	전체침하량	(-)51.48	(-)54.24	(-)59.17	(-)56.65	(-)27.03	(-)29.88	(-)31.58	(-)24.01
	선행침하비율	45.61%	48.38%	47.61%	43.51%	37.11%	39.77%	43.00%	45.86%
	설치위치	10K 084	10K 075	10K 071	10K 067	10K 063	10K 060	Avg.	
	선행침하량	(-)11.23	(-)12.17	(-)11.40	(-)15.00	(-)22.87	(-)21.70	(-)18.36	
	전체침하량	(-)19.23	(-)36.17	(-)33.40	(-)41.00	(-)39.87	(-)34.70	(-)40.71	
	선행침하비율	58.40%	33.65%	34.12%	35.80%	57.36%	62.54%	45.27%	
4막장	설치위치	10K 668	10K 662	10K 653	10K 650	10K 645	10K 642	10K 636	10K 633
	선행침하량	(-)17.54	(-)35.03	(-)25.50	(-)19.60	(-)20.06	(-)22.85	(-)20.08	(-)25.60
	전체침하량	(-)48.54	(-)69.03	(-)44.50	(-)37.60	(-)45.06	(-)45.85	(-)36.08	(-)43.60
	선행침하비율	36.14%	50.74%	57.30%	52.13%	44.52%	49.83%	55.65%	58.72%
	설치위치	10K 628	10K 617	10K 614	10K 609	10K 605	10K 601	Avg.	전체평균
	선행침하량	(-)18.17	(-)25.75	(-)30.81	(-)18.71	(-)32.92	(-)30.48	(-)24.51	(-)21.44
	전체침하량	(-)34.17	(-)75.75	(-)70.81	(-)54.71	(-)64.92	(-)58.48	(-)52.08	(-)46.40
	선행침하비율	53.17%	33.99%	43.51%	34.20%	50.71%	52.12%	47.77%	46.52%

5. 결론

본 연구에서는 상부구조물과 터널과의 심도가 2D(20m)이내인 풍화토터널 시공시 계측하기 어려운 선행변위를 보다 정확하게 실측하고자 하였고 시공 중 계측결과를 정리하고 회귀분석하였다. 선행변위의 실측방법으로 터널 막장 전방에 수평경사계를 설치하여 실시간 자동계측을 하였고, 후행변위는 굴착직후 5시간 내에 천단 및 내공변위계를 설치하여 계측을 실시하였다. 내용을 요약하면 아래와 같다.

1. 풍화토구간에서 터널 시공 시 수평경사계를 이용하여 선행변위를 계측한 결과 선행변위는 전체변위의 30~60%로 편차가 크며 평균적으로 약 50%이었다.

암반지반에 대한 수치해석연구에 따르면 선행변위는 전체변위의 20~35%이며, 계측자료를 회귀분석한 결과값이 약 30~40%이었고 암반지반에서 실제 계측한 결과에 따르면 약 40%이다. 암반터널에 비해 풍화토터널에서 선행변위는 전체변위량 대비 10%이상 증가하는 것으로 결과가 나왔는데 이는 단층파쇄대에서 수평경사계를 사용해 선행변위를 계측하여 약 60%의 결과를 얻은 김광염(2003)의 연구와도 부합된다.

2. 일부 측점에서 내공변위가 천단침하보다 큰 경우도 있었으나 전체적인 경향을 보면 천단침하가 내공변위보다 컸다. 이는 토피가 얕은 천층터널에서 나타나는 일반적인 현상으로 터널을 감싸는 아칭효과가 형성되기 어렵기 때문인 것으로 판단된다.

3. 종방향 선행변위의 분포특성을 고찰해 보면, 막장면 전방 약 2D(20m)에서 변위가 발생하기 시작하고 막장면 전방 약1D(10m)에서 선행변위의 변곡점이 발생되었다. 막장면을 지난 후 약 2D(20m) 지난 시점에서 변위가 수렴되었다. 이는 대구경 자천공 강관다단 그라우팅의 보강효과인 것으로 판단된다.

4. 선행변위와 전체변위를 하나의 그래프로 표시해보면 예외의 경우도 있지만 대체적으로 선행변위가 크게 측정된 지점에서는 전체변위도 크게 발생하였다.

참고문헌

1. 김광염, 김창용, 홍성완, 배규진, 서용석, 전제성(2003), “수평경사계를 이용한 터널내 선행변위 측정에 관한 연구, 대한토목학회, 정기학술대회논문집”, pp. 4878~4883

2. 김호영, 박의섭(1993), “터널 내공변위의 이론과 계측결과의 분석”, 터널과 지하공간, 한국암반역학회, Vol. 3 pp. 80-95.

3. 서울특별시 지하철 건설본부(1994), “3기 지하철 기본계획 수립 최종보고서”, 서울특별시 지하철 건설본부, pp. 1~72.

4. 이정인, 김치환(1991), “현장계측치의 역해석에 의한 지하공동주위암반의 응력해석 및 변형거동에 관한 연구:(ⅰ)실측내공변위의 특성분석”, 터널과 지하공간, 한국암반역학회, Vol. 1 pp. 75-90.

5. 허종석, 이종인, 조태진, 이연규(1996), “연암에 굴착되는 터널의 계측변위를 이용한 역해석”, 한국자원공학회지, Vol 33, pp. 438~447.

6. Hanafy, E.A., Emery, J.J.(1980), “Advancing face simulation of tunnel excavations and lining

placement", 13th Canadian Rock Mechanics Symp., CIMM, Montreal, pp. 119～125.

7. Kitagawa, T., Kumeta, T., Ichizyo, T., Soga, S., Sato, M.(1991), "Application of Convergence Confinement Analysis to the Study of Preceding Displacement of a Squeezing Rock Tunnel", Rock Mechanics and Rock Engineering Vol. 24, No. 1, pp. 31-51.

8. Panet, M., Guenot A.(1982), "Analysis of convergence behind the face of a tunnel", Tunnelling 82, IMM, Brighton, pp. 197～204.

9. Vassilev, V.H., Hristov, T.N,(1988), "Influence of the heading face and a two-dimensional calculation model of tunnel linings", 6th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomech., Innsbruck, V.3, pp. 1551~1555.